



CNESTEN

Neutronographie appliqué au contrôle d'éléments du combustibles.

A. Ouardi

Centre National de L'Énergies des Sciences et
des techniques Nucléaires

Plan

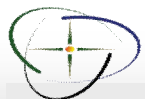
- Introduction
- Technique de Neutronographie
- Neutrons Vs. rayons X pour le contrôle d'éléments de combustible nucléaires
- Caractéristiques de station d'imagerie par neutron pour le contrôle des élément de combustible
- Systèmes de détection
- Applications :
 - Détection de fissures ou de corrosion (Étude qualitatif)
 - Détermination de la teneur en hydrogène sous la gaine du crayon du combustible
 - Détermination de l'enrichissement ou taux de poison du combustible.



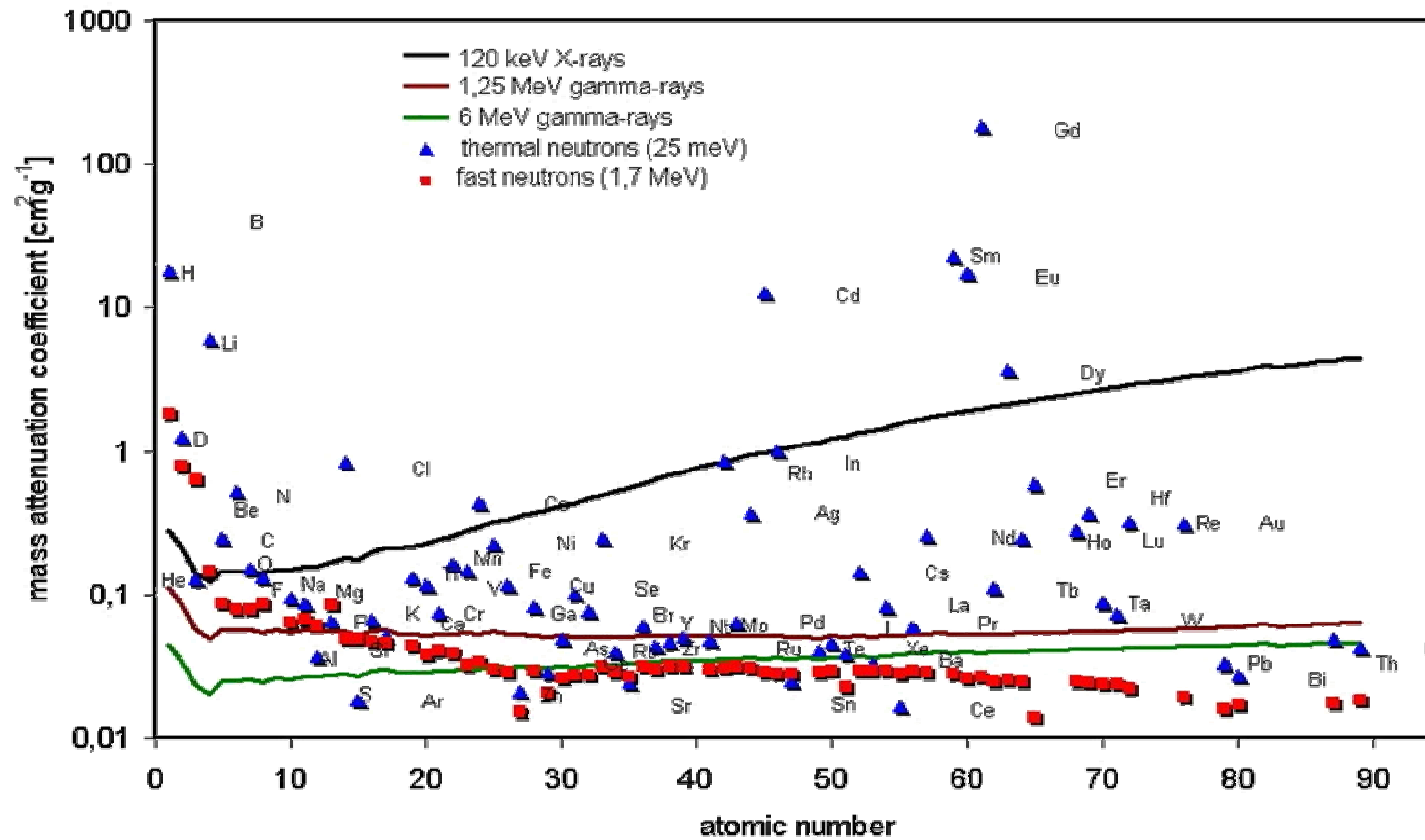
Introduction

La neutronographie aide au contrôle du combustible nucléaire (U or Pu) à savoir :

- **qualité** de production des **pastilles** de combustible (distribution...etc)
- Détection de **fissures**
- Le contrôle d'**étanchéité** de la **gaine** en zircaloy du crayon combustible
- Taux **enrichissement** du crayon combustible
- **Détection** et évaluation **quantitatif** de **poisons neutronique** .
- Définition de la teneur en **Hydrogènes** sous la gaine du crayon combustible



Neutrons Vs. rayons X pour le contrôle d'éléments de combustible nucléaires



Comparaison des coefficient d'atténuation de masse, de différents élément chimique, pour les neutron et les rayons X

Neutrons Vs. rayons X pour le contrôle d'éléments de combustible nucléaires

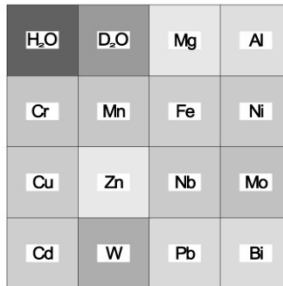
Thickness of materials: 1 cm

Neutrons

thermal neutrons (E = 25 meV)



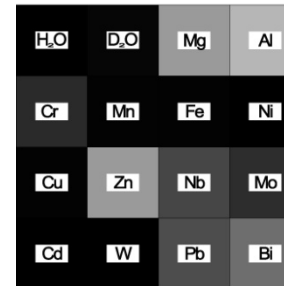
fast (fission) neutrons (E = 1.7 MeV)



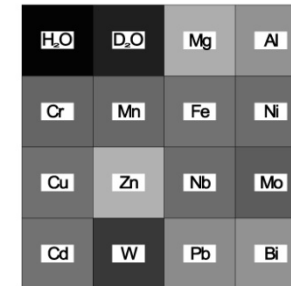
Thickness of materials: 4 cm

Neutrons

thermal neutrons (E = 25 meV)

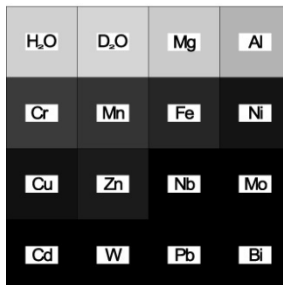


fast (fission) neutrons (E = 1.7 MeV)

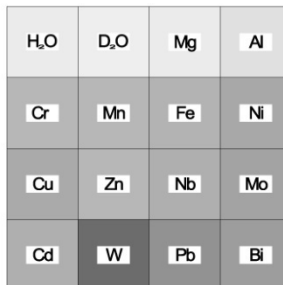


X-rays and gamma-rays

X-rays (E = 120 keV)

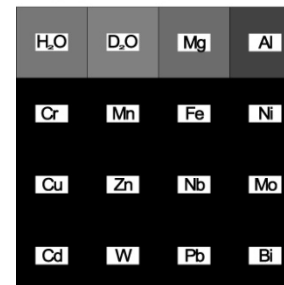


gamma-rays (E = 1.25 MeV)

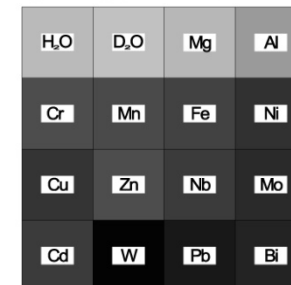


X-rays and gamma-rays

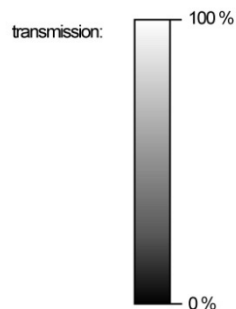
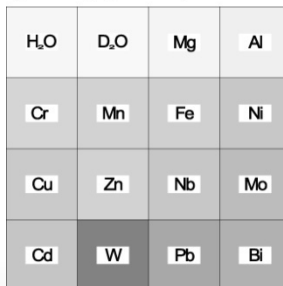
X-rays (E = 120 keV)



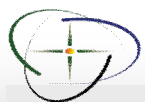
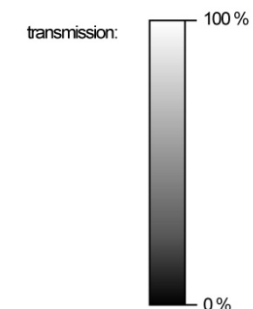
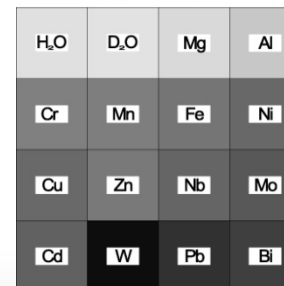
gamma-rays (E = 1.25 MeV)



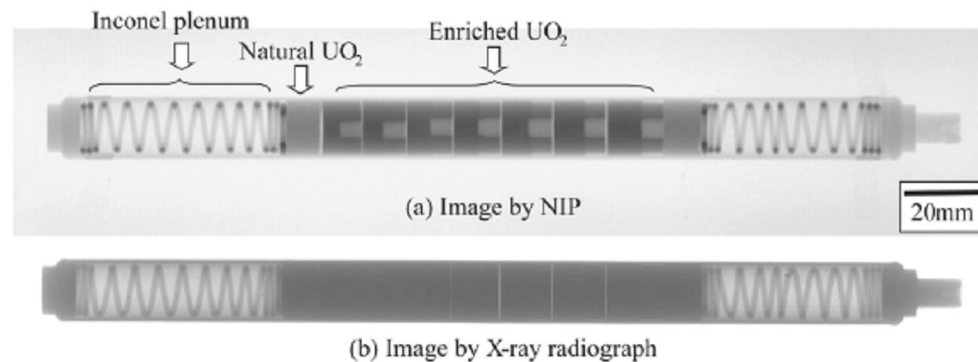
gamma-rays (E = 6 MeV)



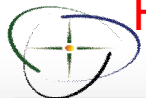
gamma-rays (E = 6 MeV)



Neutrons Vs. rayons X pour le contrôle d'éléments de combustible nucléaires

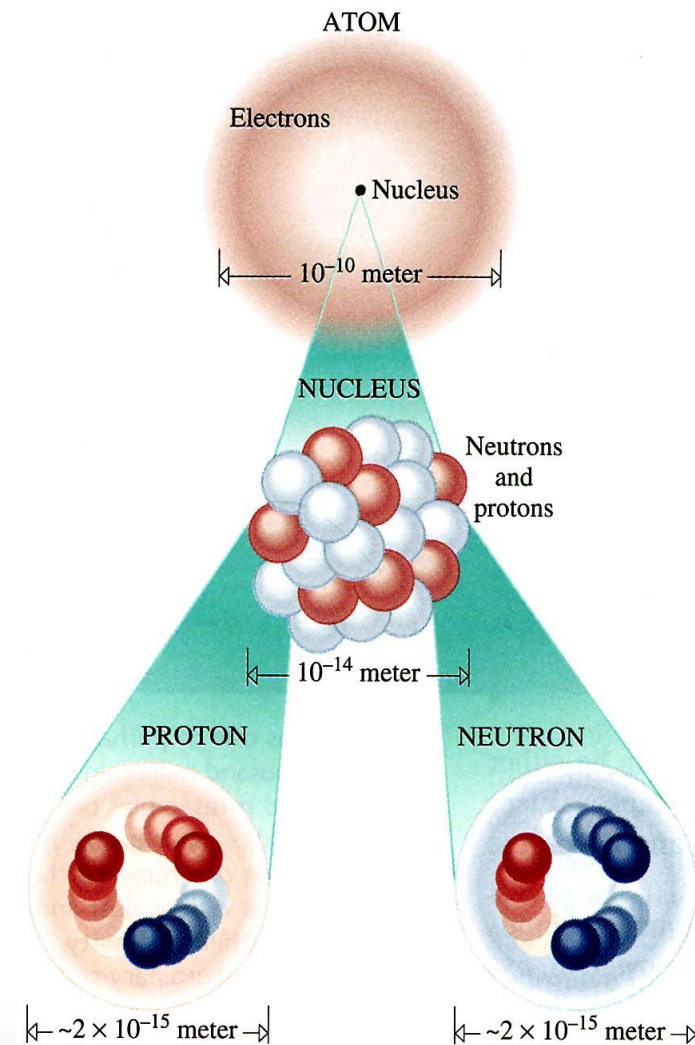


- ❑ Contrôle de la qualité du combustible neuf d'une pastille ($\varnothing = 10$ mm) est possible $E > 1$ MeV.
- ❑ $\mu(^{235}\text{U}) = 0,8 \text{ cm}^{-1}$ (neutron thermique) assure une bonne transmission même pour des assembles de grandes épaisseurs.
- ❑ Du faite que $\Sigma^{238}\text{U} = 60 \Sigma^{235}\text{U}$, facile de **distinguer** entre les deux isotopes **facile** de quantifier le combustible ^{235}U .
- ❑ Bore, Li, Dy et Gd **facile à détecter** par la neutronographie comparé rayon X (**impossible**).
- ❑ Difficile de détecté **Hydrogènes** vue leur **faibles contraste par rayons -x** (produites après longues périodes d'irradiation)
- ❑ Par neutronographie, on a même la possibilité de quantifié le taux d' **Hydrogènes présent dans la gaines**.



Technique NR : Neutron

- nucléon
- neutre
- **10.000** fois plus petit que les atomes
- pénètre dans la matière massive
- riche en contraste
- longueur d'onde **$\lambda = 0,05 \dots 100 \text{ nm}$**
- possède un moment magnétique



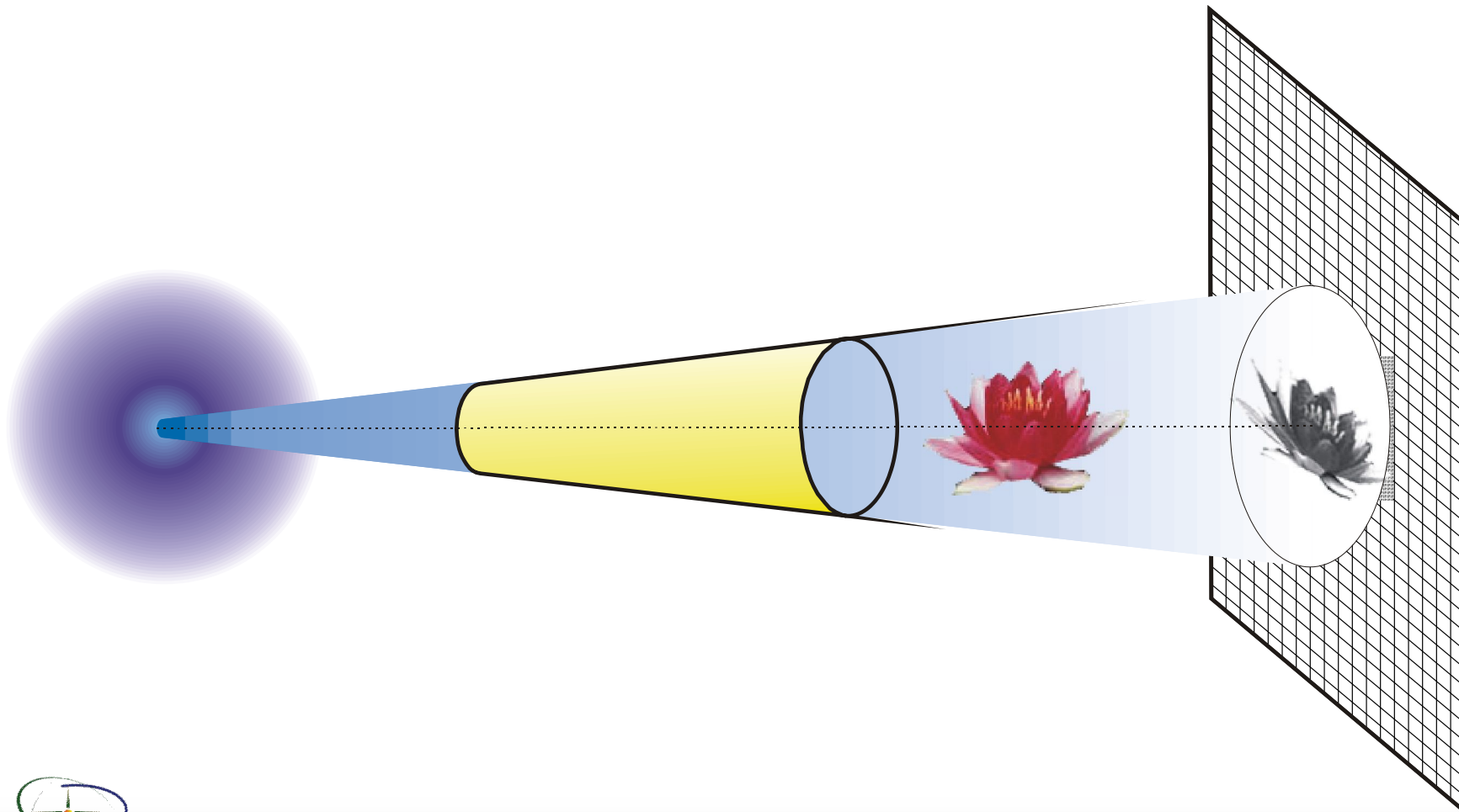
Technique NR :Principe de l'imagerie par neutron

source

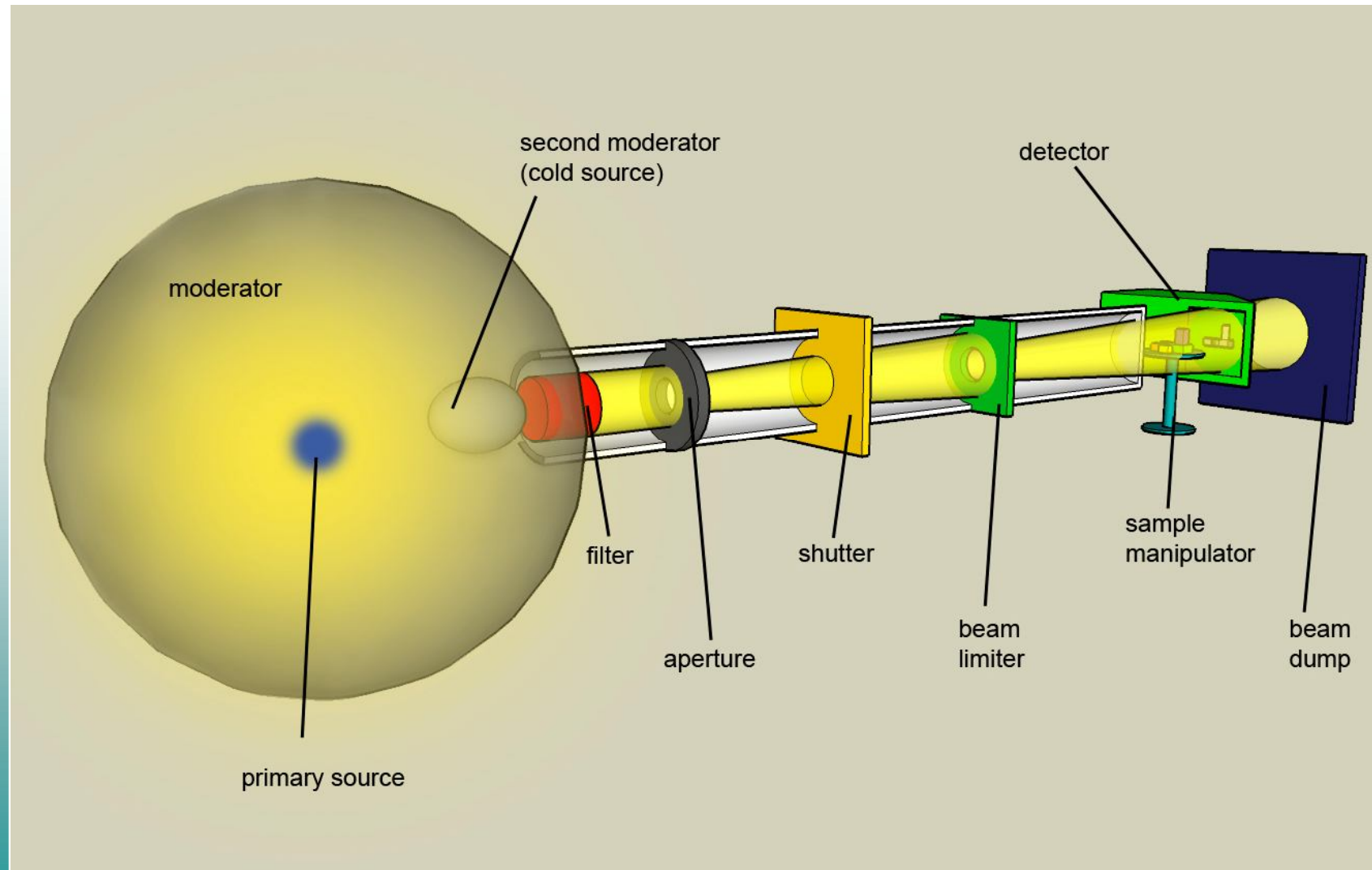
collimator

object

detector



Technique NR : Design de Station



Technique NR : Design de Station

- Source de neutron (réacteur, spallation source, accélérateur, ...)
- Système de modération
- Filtres, sélecteur d'énergie
- Diaphragme du faisceau
- Line de faisceau (tube de vol ...etc)
- système obturateur /access control
- Table de manipulation d'échantillons
- Système de détection
- Beam dump
- Écrans / protection biologique & contrôle

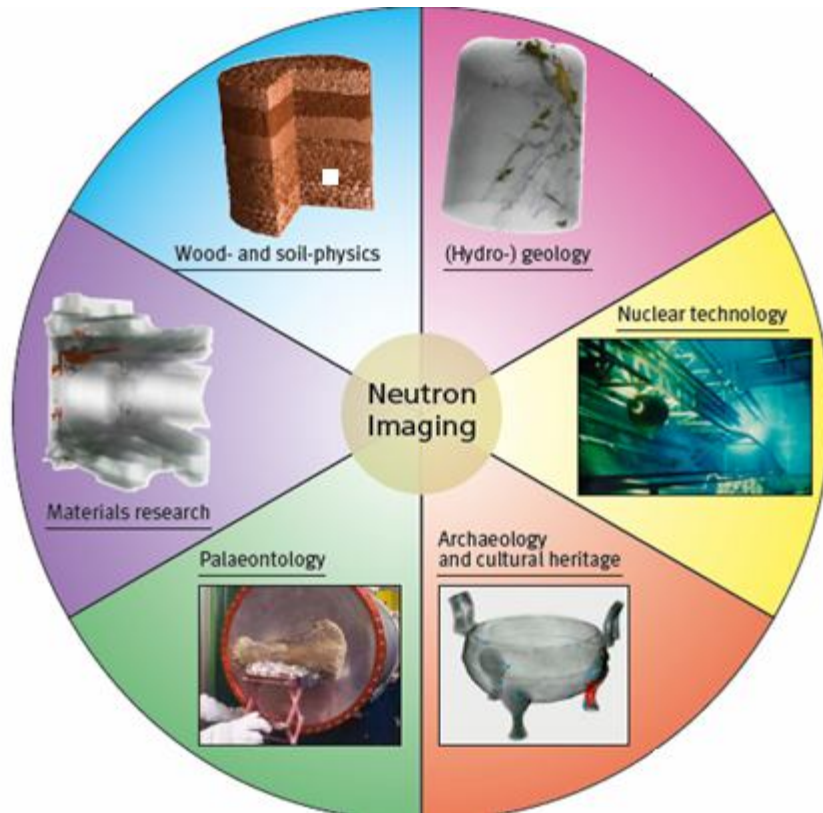
Technique NR : Caractéristiques de Station NR

- Faisceau de neutrons d'intensité important dédié à la technique.
- Haut taux de collimation ($L/D > 500$).
- Spectre de neutron thermiques ou froid bien défini
- Faible bruit de fond de rayons gamma.
- Large champs d'irradiation (faisceau $\varnothing > 20$ cm).
- **Espace dédié** pour l'infrastructure à l'intérieur un espace étanche aux rayonnements (bonne protection biologique)
- Système de détection **Digital**.
- Manipulateur d'échantillons avec télécommande à distance.
- Programmes et logiciel de traitement d'image.

Technique NR : Caractéristiques de Station NR

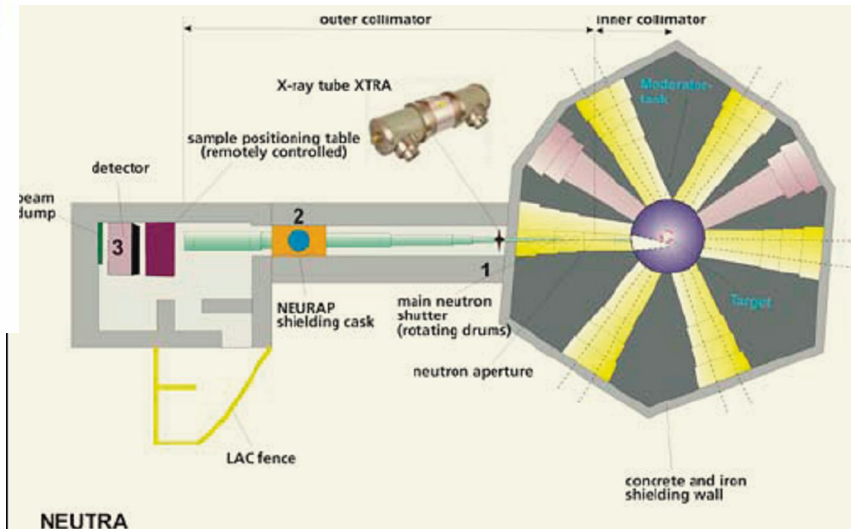
- Alternative pour les testes non destructifs, comparable et complémentaire au rayons X et gamma.
- Différents mécanisme de contraste , différents transmission → Différent dimension de l'échantillon.
- Disponibilité de nouvelles méthodes d'imagerie par neutron (image digitale, tomographie, la méthode « phase-contrast », études de phénomènes instationnaires, ...) → **important: image post-processing**
- Reste un besoin de station d'imagerie par neutron qui répond au critères cité ci-dessus à travers le monde (**seulement 15**)

Technique NR : Exemple station NEUTRA (PSI)



Performance parameters of the radiography stations at the spallation neutron source SINQ (PSI)

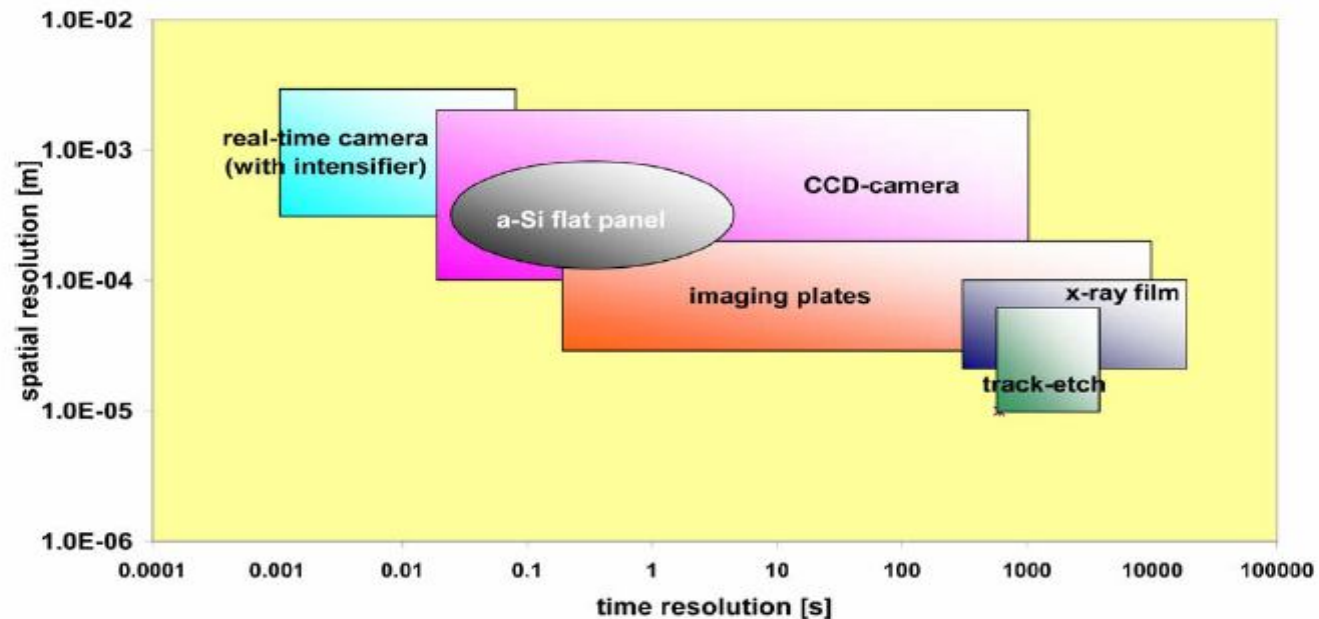
Facility	NEUTRA	NCR
Neutron-flux intensity ($\text{cm}^{-2}\text{s}^{-1}$)	$3 \times 10^6 - 2 \times 10^7$	5×10^8
Collimation ratio L/D	250–550	75
Beam size	$\varnothing 40 \text{ cm}$	$3 \text{ cm} \times 12 \text{ cm}$
Spectrum	Thermal	Cold
Mean energy (meV)	25	3



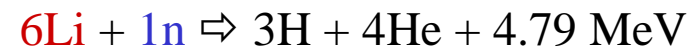
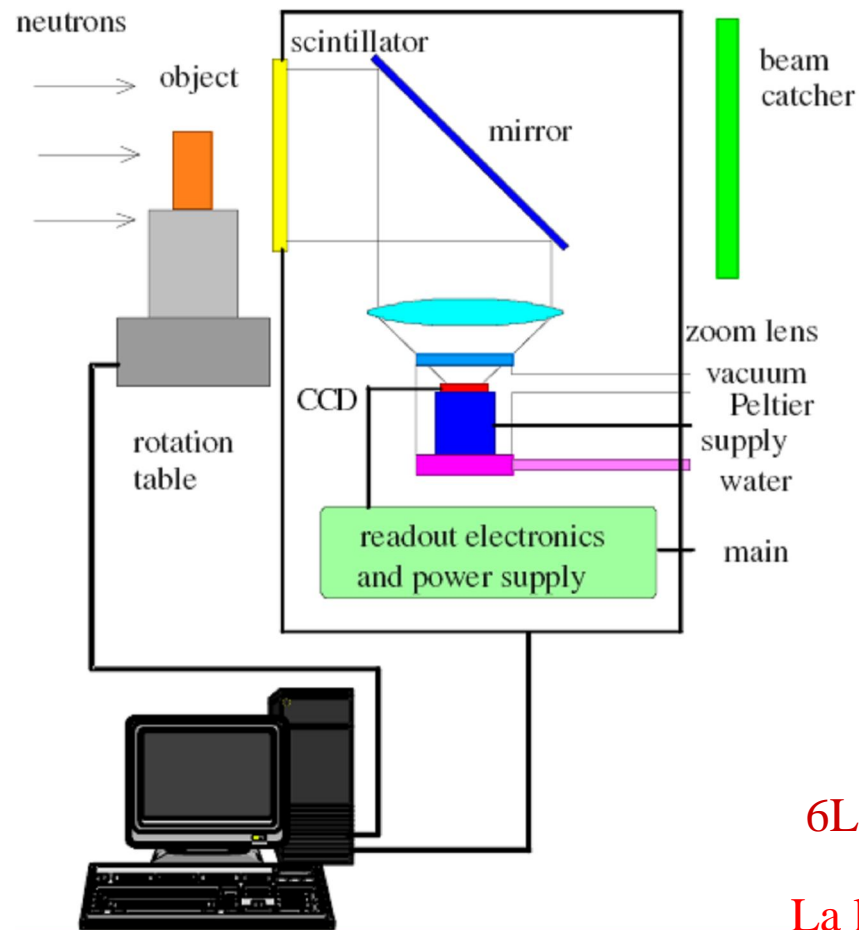
Systemes de Détection

Properties of the detections systems in use for digital neutron imaging purposes

Detector system	X-ray film and transmission light scanner	Scintillator + CCD-camera	Imaging plates	Amorph silicon flat panel
Max. spatial resolution (μm)	20–50	100–500	25–100	127–750
Typical exposure time for suitable image	5 min	10 s	20 s	10 s
Detector area (typical)	18 cm \times 24 cm	25 cm \times 25 cm	20 cm \times 40 cm	30 cm \times 40 cm
Number of pixels per line	4000	1000	6000	1750
Dynamic range	10^2 (non-linear)	10^5 (linear)	10^5 (linear)	10^3 (non-linear)
Digital format	8 bit	16 bit	16 bit	12 bit



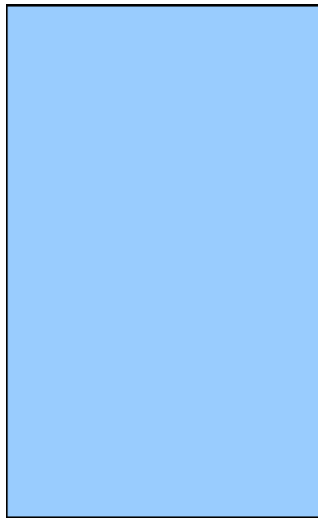
Systemes de Détection



La lumière émise sera détecté par la caméra CCD à haute sensibilité.

Systemes de Detection: Plaques d'Images (imaging plate)

États électroniques sont excités par le champ de rayonnement appliqué. Le scanner laser permet de convertir l'émission de lumière de désexcitation en signal numérique et produire une image. La plaque peut être utilisée à plusieurs reprises après avoir effacé.



Plaque d'image
typique
20cm X 40 cm

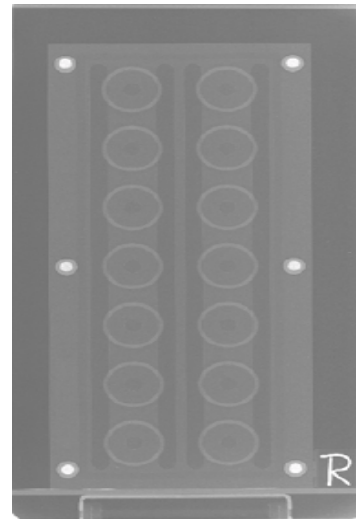


Image produite
par PI



Scanner et effaceur
(scanner + eraser)

Systemes de Detection: Plaques d'Images (imaging plate)

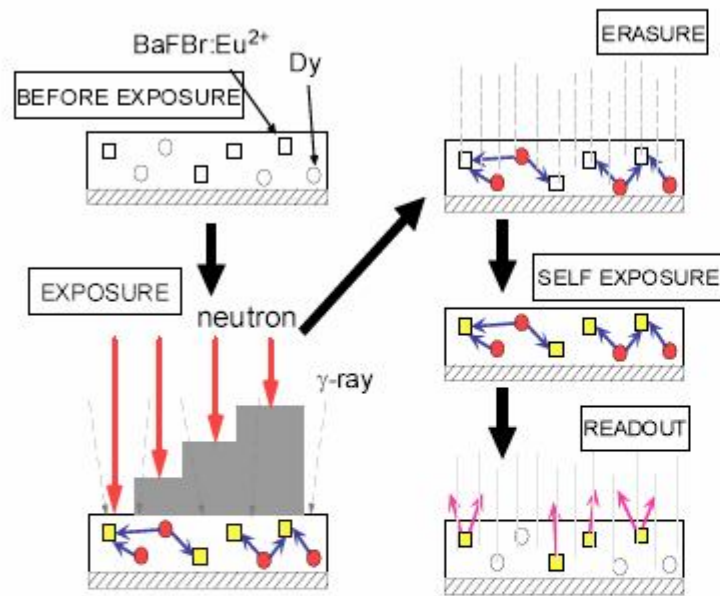


Fig. 1. Schematic of Dy-IP function modeling: neutron and γ -ray exposure (memory of radiation profile), IP erasure by intense lighting (diminishing of image memory), self-exposure (autoradiographic imaging by Dy-165 decay) and readout (PSL values of IP NR image).

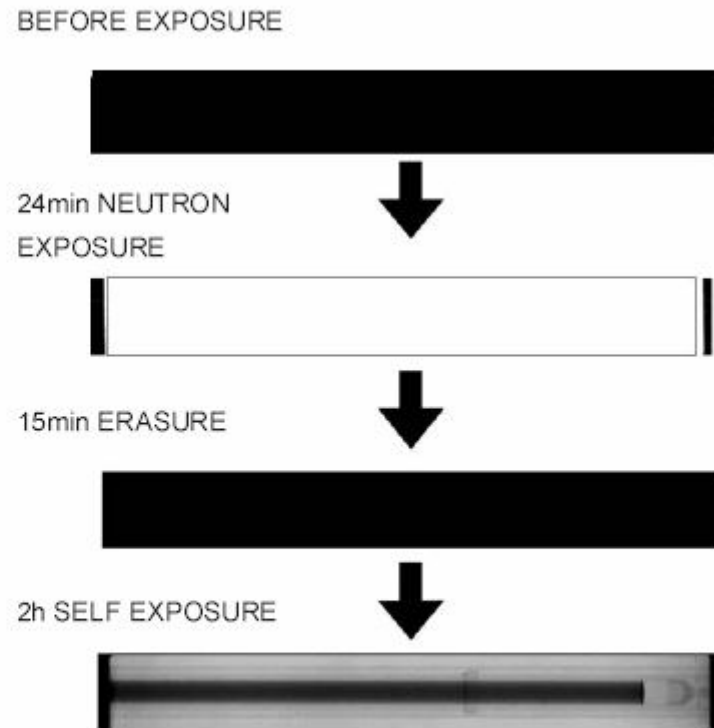


Fig. 2. Typical Dy-IP imaging process for post-irradiation nuclear fuel pin : image before exposure, neutron (+ γ -ray) exposure image, image just after erasure, and image after self-exposure.

Systemes de detection

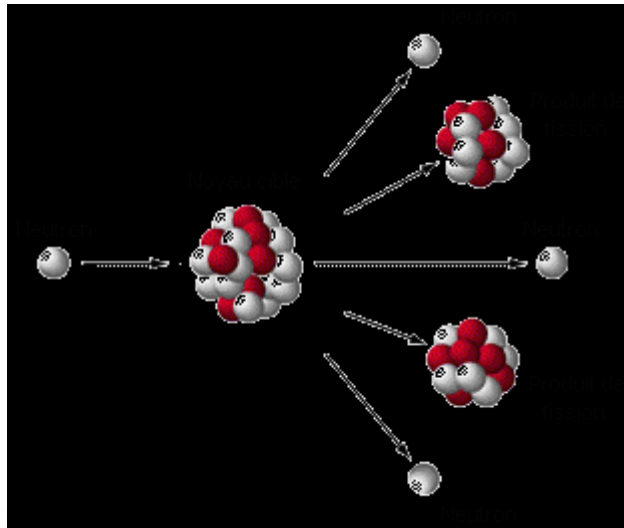
Inspection method	Converter + Imaging Plates	Track - etch foils + Digitiser
Exposure time in the neutron beam	5 min	15 min
Image plate exposure	about 3 h	-
Duration of the etching procedure	-	15 min
Size of the inspected field	30 cm x 4 cm	24 cm x 4 cm

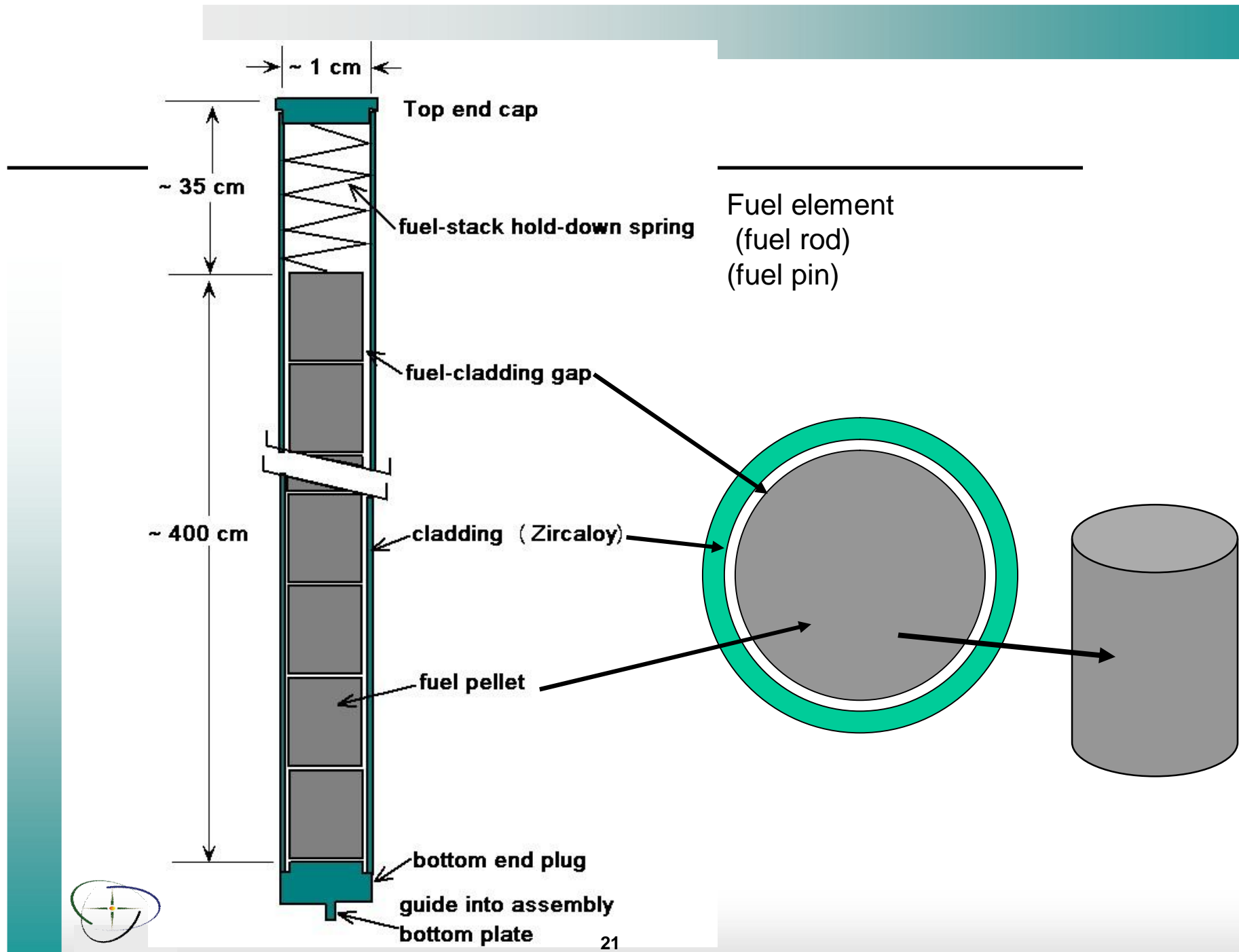
Systemes de Détection



Applications : Éléments de combustibles Nucléaires

- Le combustible nucléaire est tout matériel qui peut être consommé pour produire de l'énergie nucléaire.
- ^{235}U et ^{239}Pu sont des éléments fissiles qui peuvent être amenées à subir des **réactions nucléaires** en **chaîne de fission** dans un réacteur nucléaire.

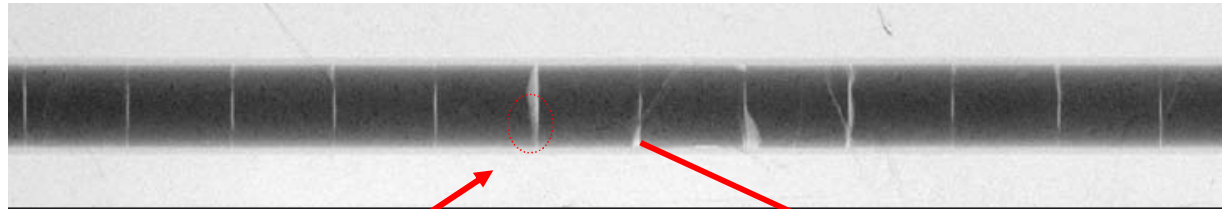




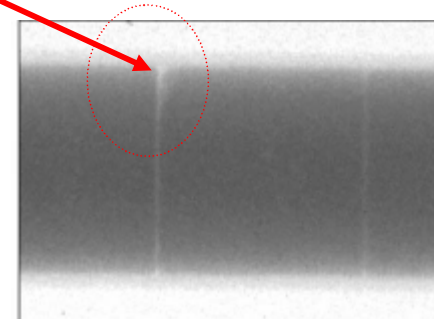
Applications : Contrôle d élément de combustible

Contrôle qualitatif

- Détection de défaillance au niveau de la gaine



Pastille d'un élément combustible utilisé avec quelques indications pour la défaillance des matériaux. Il manque du matériau sur le bord supérieur gauche de la pastille centrale.



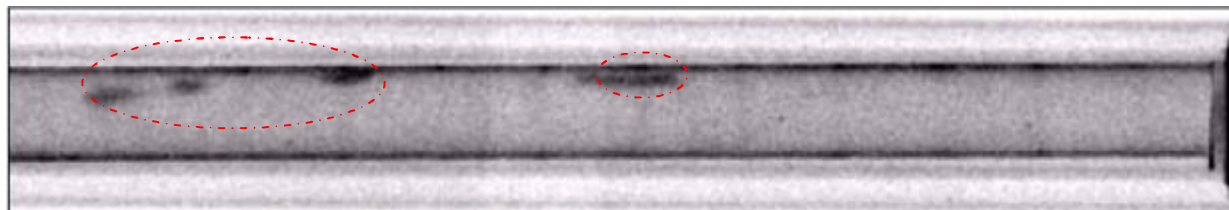
Applications : Contrôle d élément de combustible

Contrôle qualitatif

- Détection de corrosion au niveau de la gaine



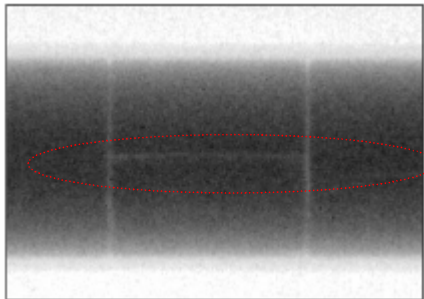
Fig. 10. Steel target rod with Zr cladding after exposure with protons in the target of the spallation source SINQ. The black points are attributed to the agglomeration of hydrogen on the inner side of the Zr cladding. Because the sample is highly activated, a well shielded facility was used for the investigations.



Applications : Contrôle d élément de combustible

Contrôle qualitatif

- Endommagement au niveau des pastilles du combustible

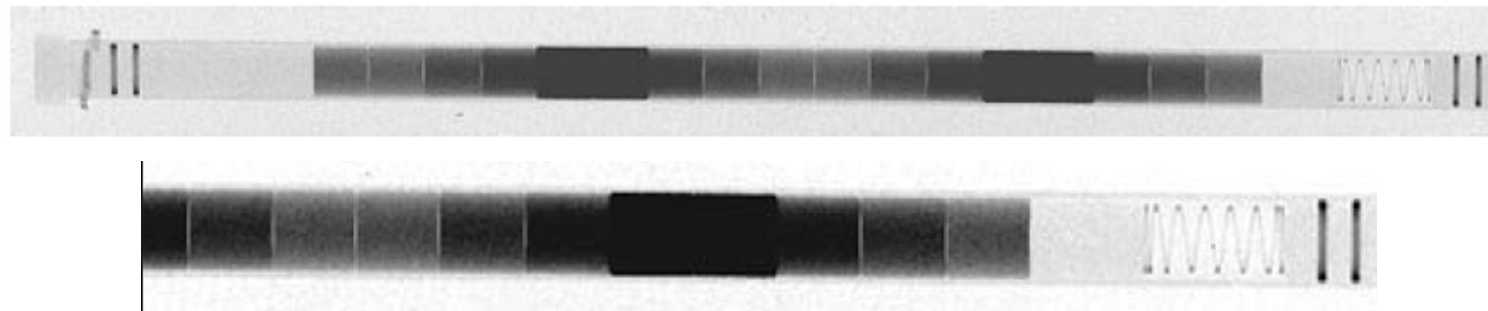
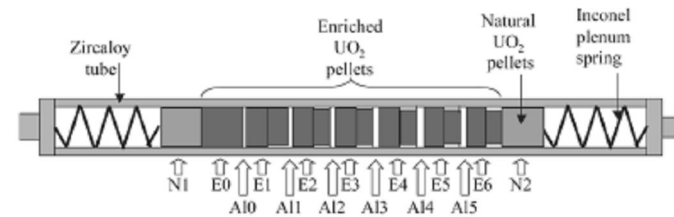


Au milieu une fissure le long de la pastille

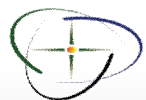
Applications : Contrôle d élément de combustible

Contrôle qualitatif

- Contrôle d'enrichissement des pastille

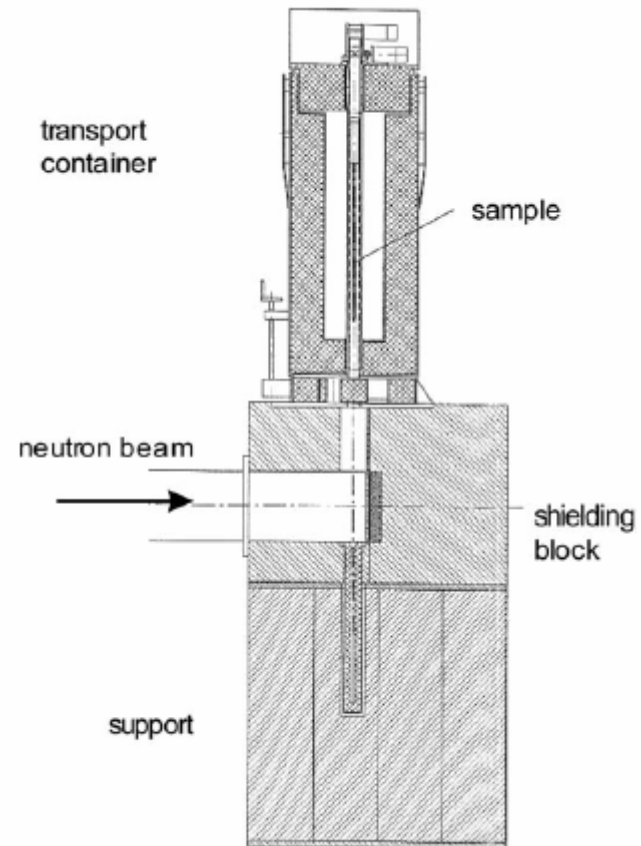
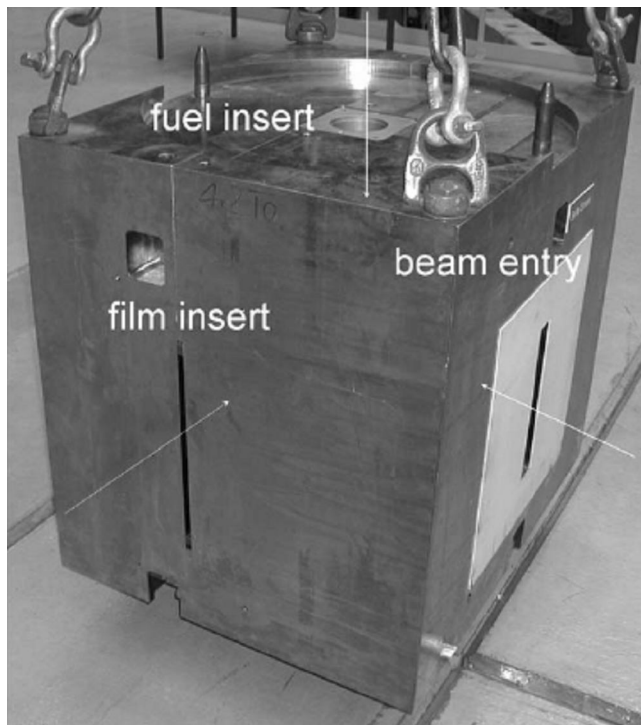


A dummy fuel element with zirconium cladding and uranium pellets of different enrichment was inspected in transmission mode with neutrons. The gray values correspond directly to the fuel enrichment, and quantification is possible with good precision. The black areas in the image are gadolinium "poisoned" fuel pellets. The zirconium cladding material is very transparent for thermal neutrons compared to the uranium fuel

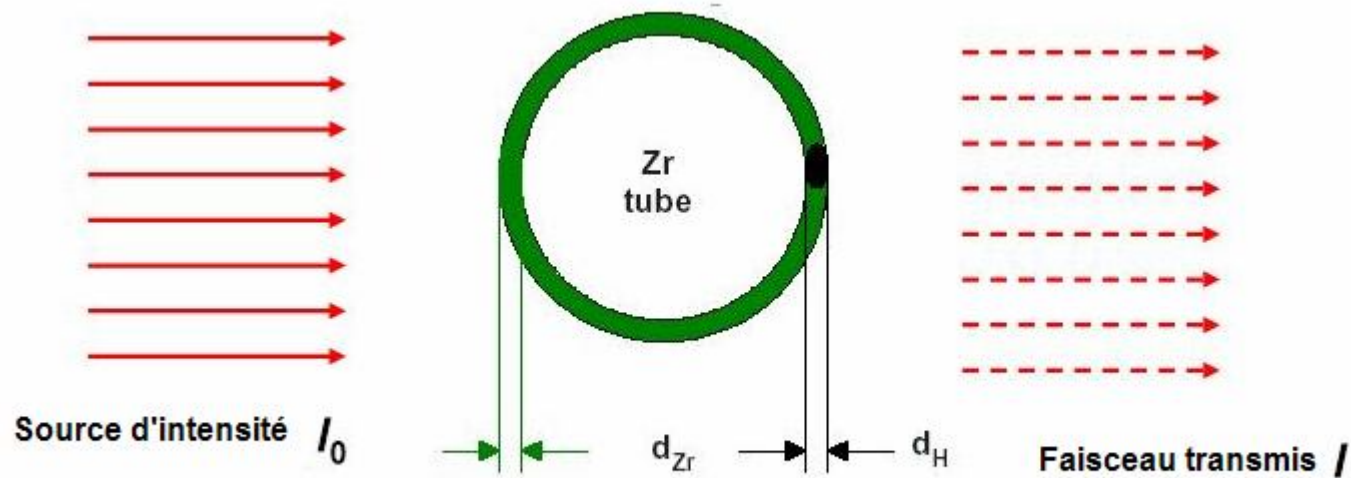


Applications : Teneur en hydrogène sous la gaine du crayon de combustible

Dispositif expérimentale & procédures



Applications : Teneur en hydrogène sous la gaine du crayon de combustible



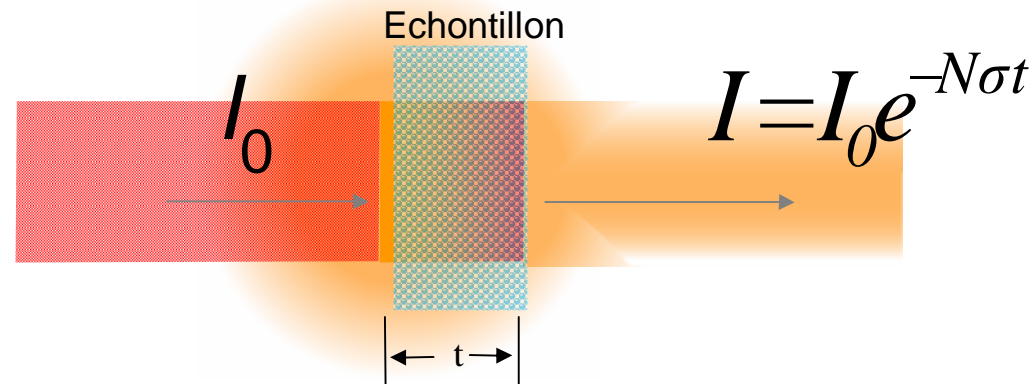
$$I = I_0 \cdot e^{-\Sigma_{Zr} \cdot d_{Zr}} \cdot e^{-\Sigma_H \cdot d_H} \cdot e^{-\Sigma_{Zr} \cdot d_{Zr}}$$

$$= I_0 \cdot e^{-(2 \cdot \Sigma_{Zr} \cdot d_{Zr} + \Sigma_H \cdot d_H)}$$

$$\Sigma_{Zr} = 0.24 \text{ cm}^{-1}$$



Applications : Teneur en hydrogène sous la gaine du crayon de combustible



N_H = Nombres d'atomes

t = épaisseur d'échantillon ou Hydrogène

σ_H = section efficace due à l'absorption et la diffusion des neutron thermiques sur les atomes d'Hydrogènes

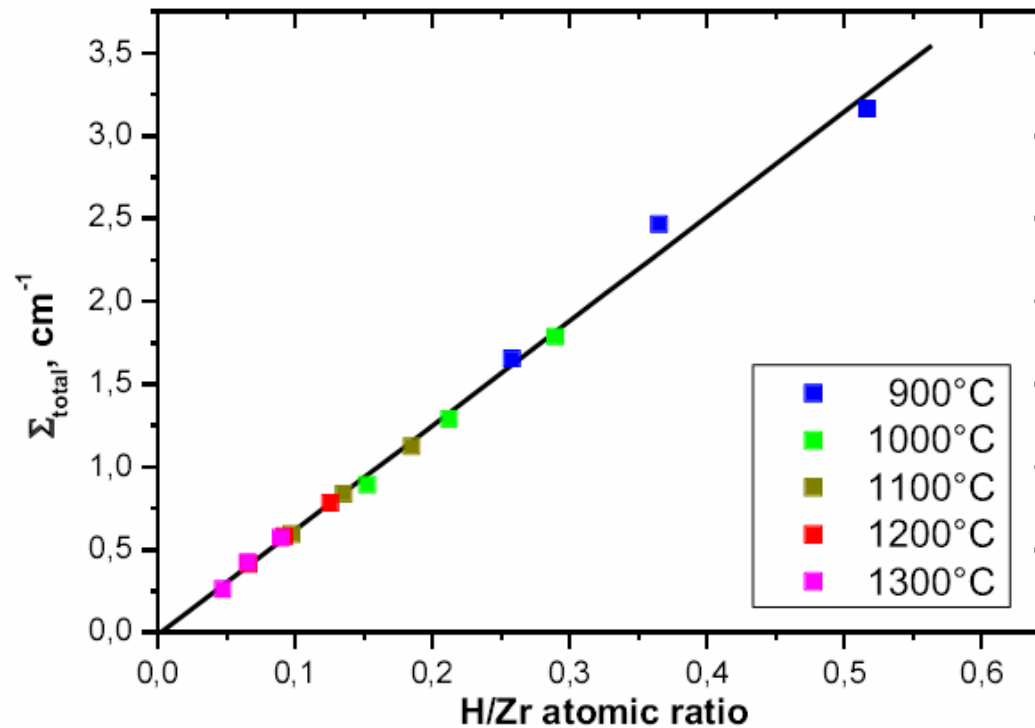
Nombre d' atomes H: $N_H = -\ln(I/I_0) / \sigma_H t = \Sigma_H / \sigma_H$



Applications : Teneur en hydrogène sous la gaine du crayon de combustible

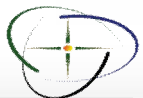
$$N_H = \frac{\Sigma_H}{\sigma_H} = \left(\ln\left(\frac{I_0}{I}\right) - 2\Sigma_{Zr}d_{Zr} \right) / (\sigma_H d_H) \quad \Sigma_{Zr} = 0.24 \text{ cm}^{-1} \text{ (NEUTRA)}$$

$\sigma_H = 58 \text{ barn}$



➤ Dépendance linéaire entre H/Zr et Σ_{total} .

➤ Insensible à la variation de la T



Applications : Teneur en hydrogène sous la gaine du crayon de combustible

Rods with test samples

Rod No.	Test Sample Type	Thermo-couple
1	Tensile, Tear, TEM/SP*	Yes (2x)
2	Tensile, Tear, TEM/SP	No
3	B-fatigue, Tensile, TEM/SP	No
4	Tear, TEM/SP	Yes (2x)
5	Bend bar, TEM	No
6	Bend bar, TEM	No
7	Charpy	No
8	Charpy	No
9	Charpy	No
10	Tensile, Tear, TEM/SP	Yes (2x)

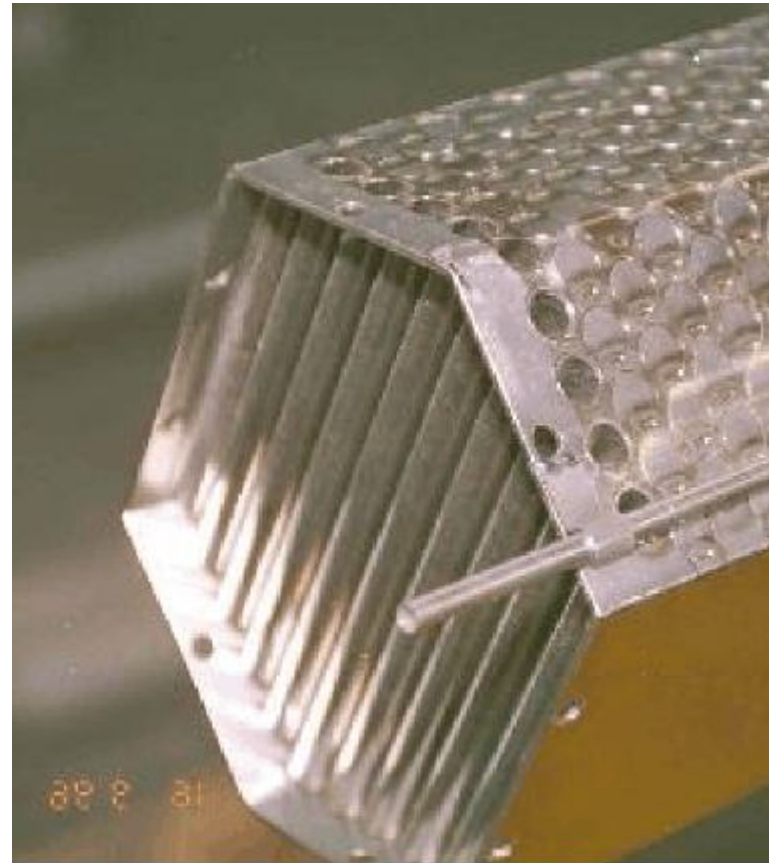
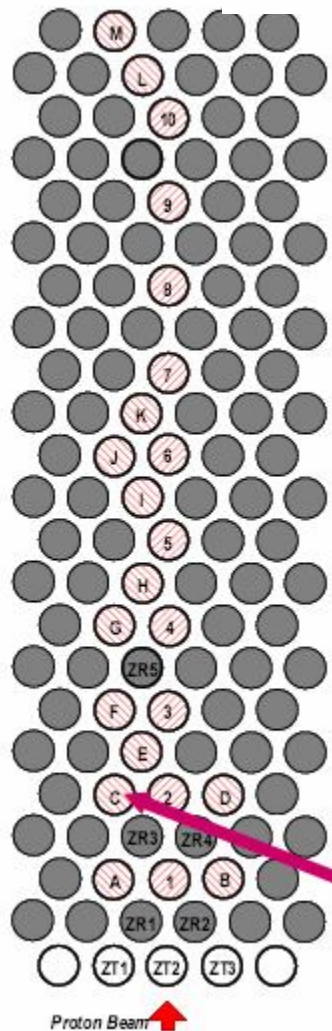
Rods with fillings

Rod No.	Filling	Thermo-couple
A	SA 316L	No
B	CW 316L	No
C	F82H (martensitic steel)	No
D	9Cr-1Mo (martensitic steel)	No
E	Lead	No
F	Lead	Yes (1x)
G	Lead	No
H	9Cr-1Mo (martensitic steel)	No
I	Lead	No
J	Lead	No
K	316L	No
L	Lead	Yes (1x)
M	Lead	No

Removable Zircaloy rods and tubes

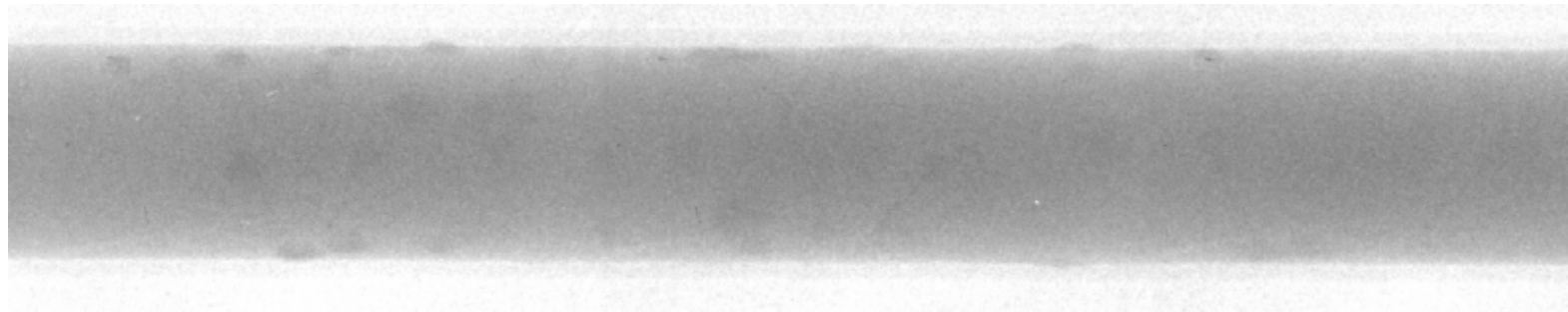
Rod No.	Thermo-couple	Tube No.	Thermo-couple
ZR1	Yes (1x)	ZT1	No
ZR2	No	ZT2	No
ZR3	Yes (1x)	ZT3	No
ZR4	No		
ZR5	No		

SINQ-Target MARK-II

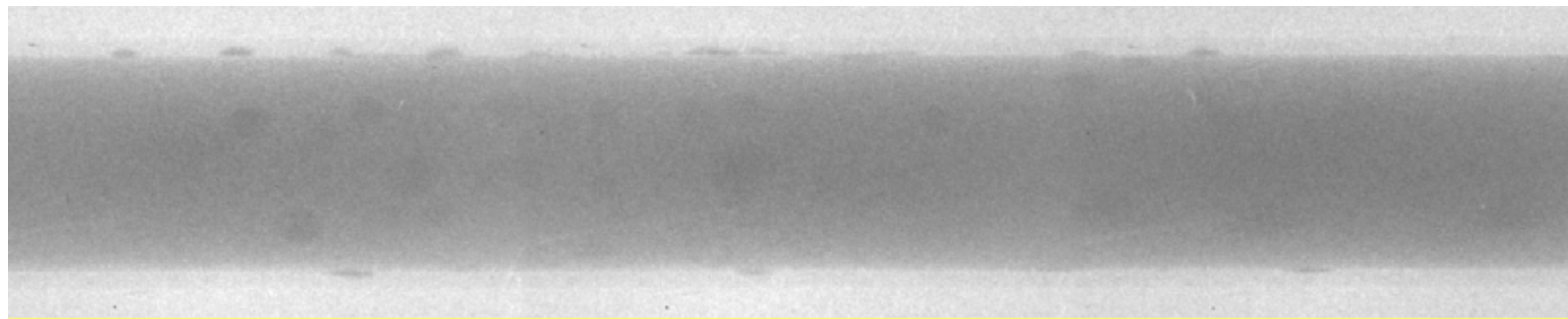


observed sample „C“

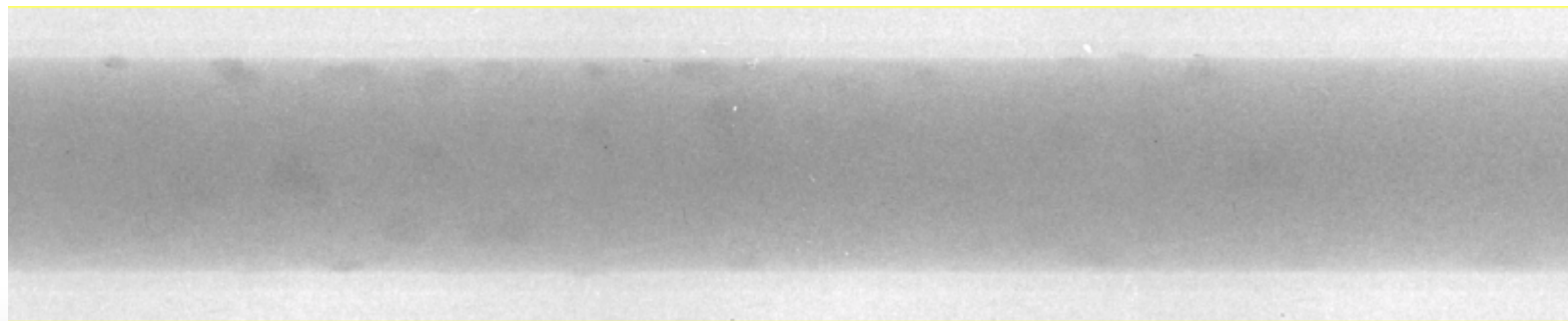
Applications : Teneur en hydrogène sous la gaine du crayon de combustible



30°

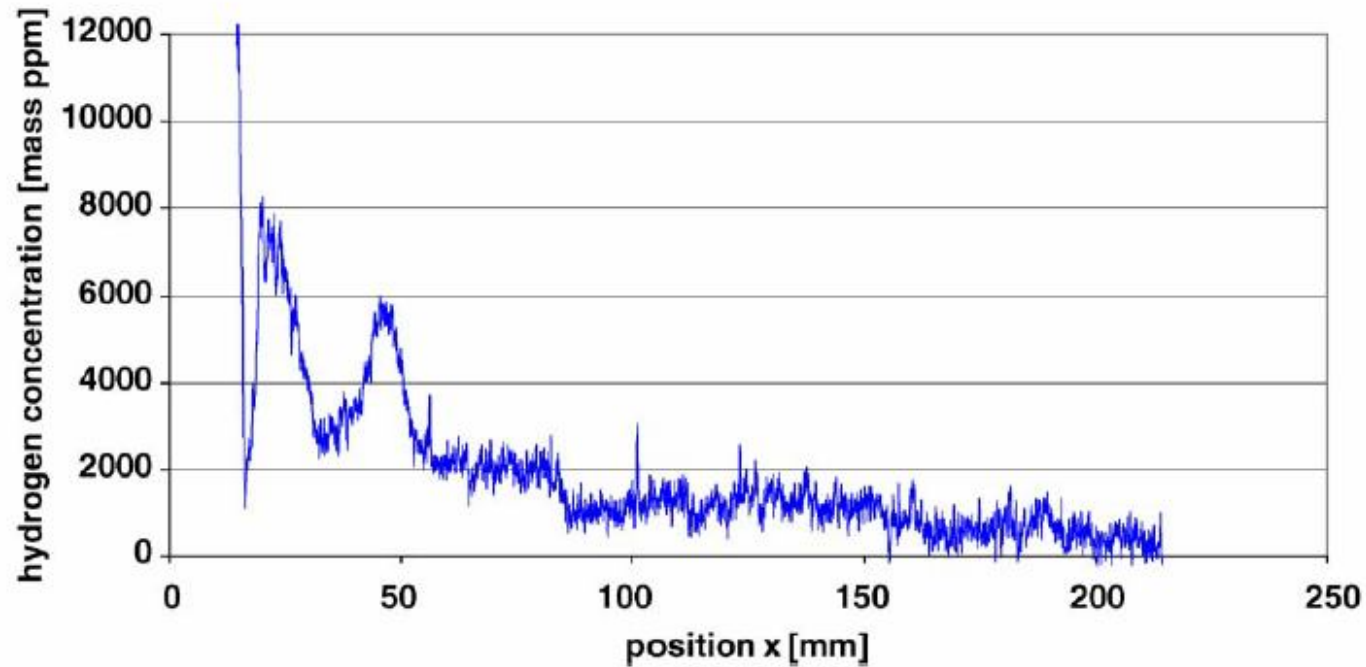
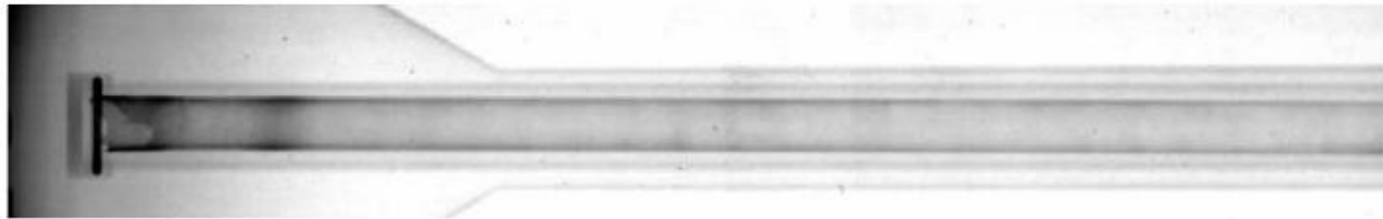


60°

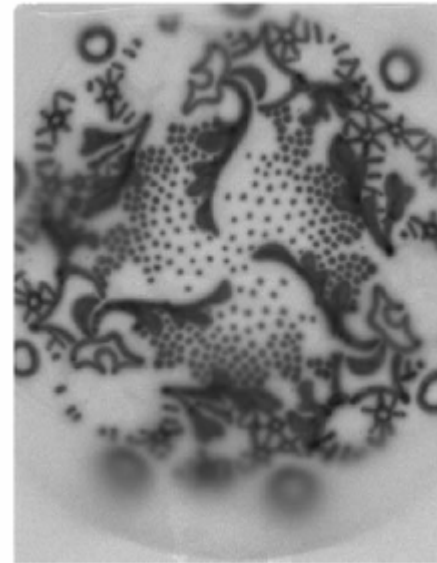


90°

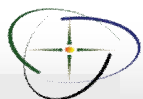
Applications : Teneur en hydrogène sous la gaine du crayon de combustible



Applications : Enrichissement des pastilles de combustible

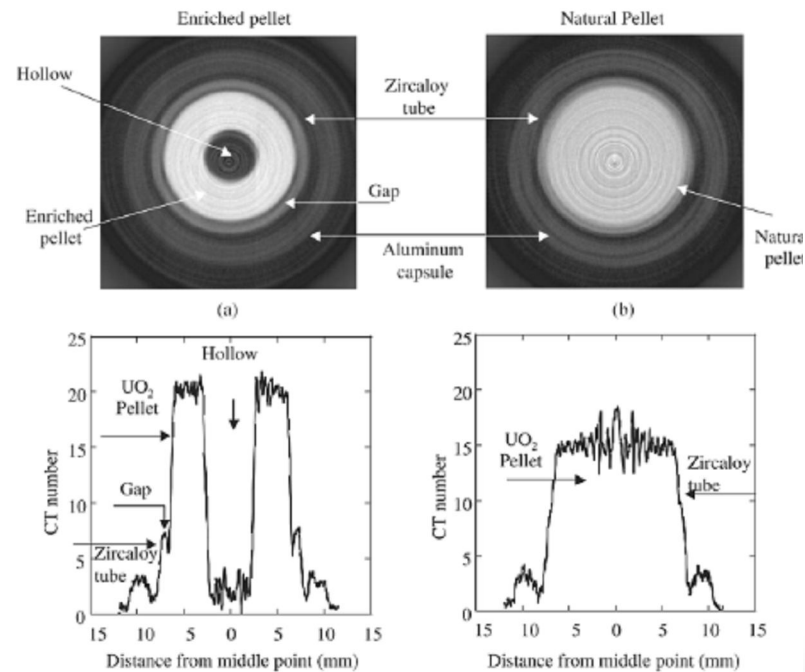


Assiette peinte avec une couleur qui contient de l'**uranium**:
la répartition de l'Uranium a été mesurée à l'aide de plaques d'imagerie après une exposition de seulement quelques heures.
L'image montre clairement, les parties des l'assiette contenant de l'uranium.

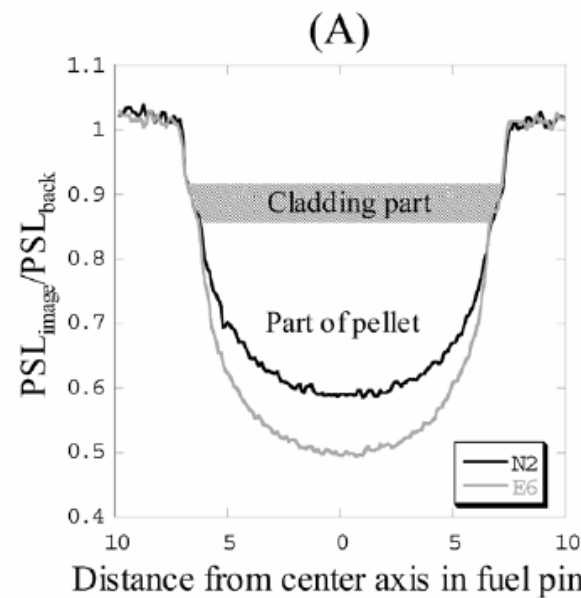
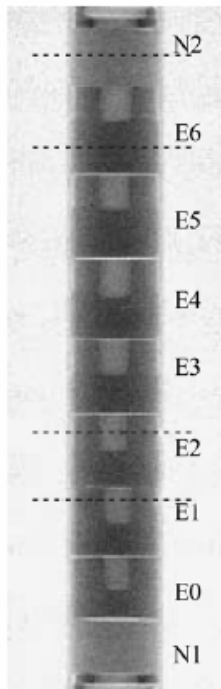
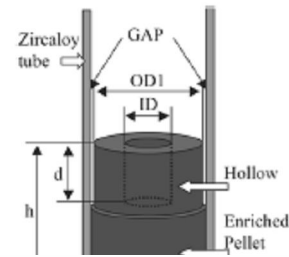


Applications : Enrichissement des pastilles de combustible

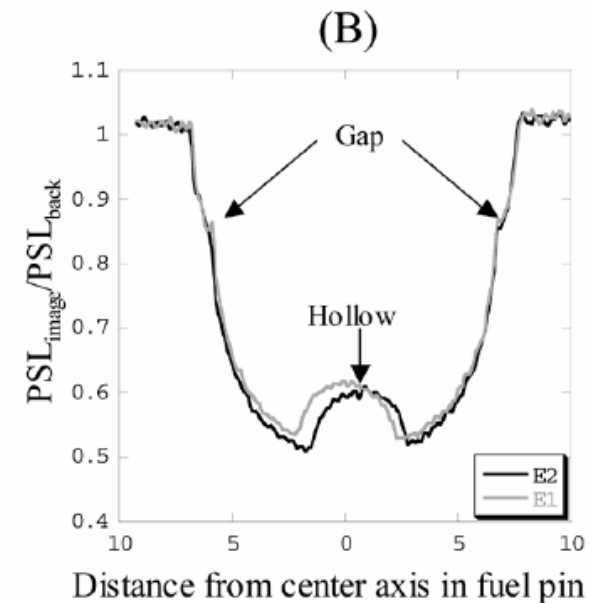
- La détermination de l'**U-235** dans l'enrichissement pastilles de combustible avec les méthodes de transmission est basée sur la grande différence dans le total des sections de son deux isotopes principaux **U-235** et **U-238** .
- Même de petites différences peuvent être distinguées avec les système de détection, qui est capable de discriminer des à 65 000 niveaux de gris dans les images.



Applications : Enrichissement des pastilles de combustible



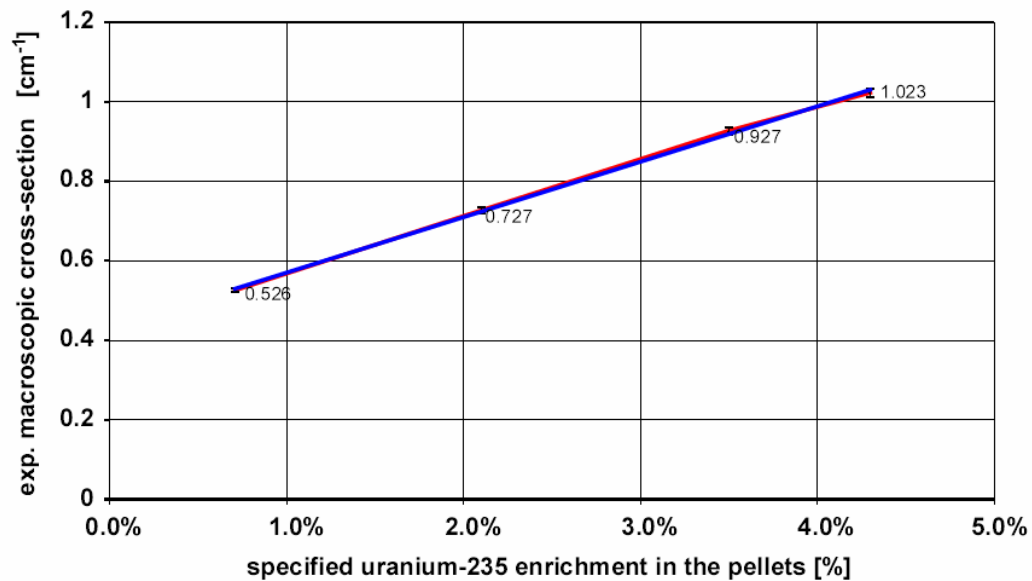
Comparison between PSL_{image}/PSL_{back} of natural (N2) and enriched (E6) pellets.



Comparison between PSL_{image}/PSL_{back} of enriched pellets of (E1) and (E2).

Applications : Enrichissement des pastilles de combustible

$$\Sigma_U = \ln(I_0/I)/d_{\text{fuel}} \quad \text{and}$$
$$\Sigma_U = \sigma_{\text{tot}}^{\text{U-235}} N_{\text{U-235}} + \sigma_{\text{tot}}^{\text{U-238}} N_{\text{U-238}}$$



Applications : Détermination taux de poison du combustible.

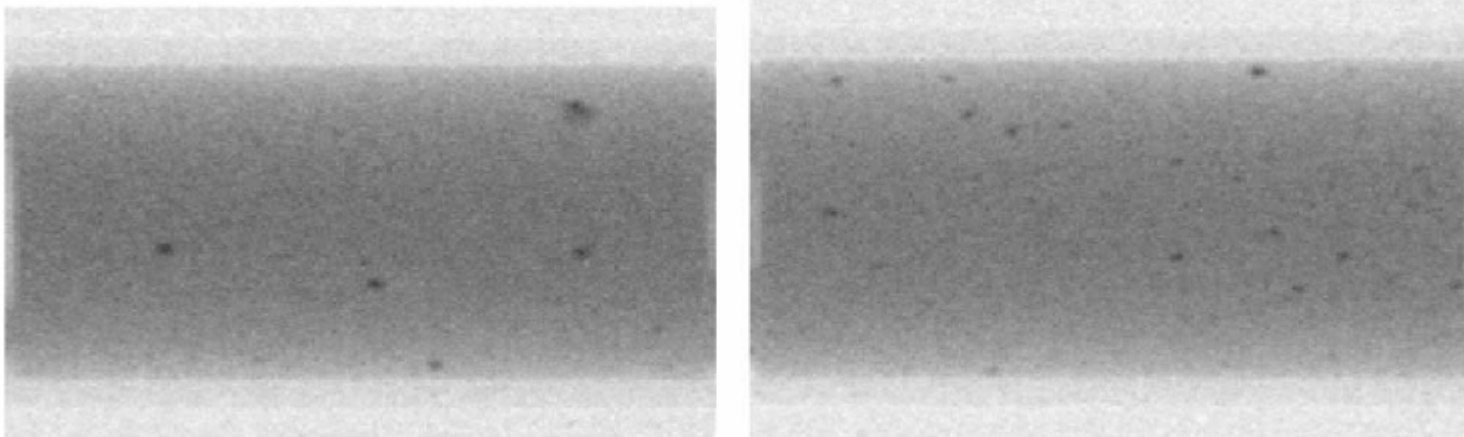
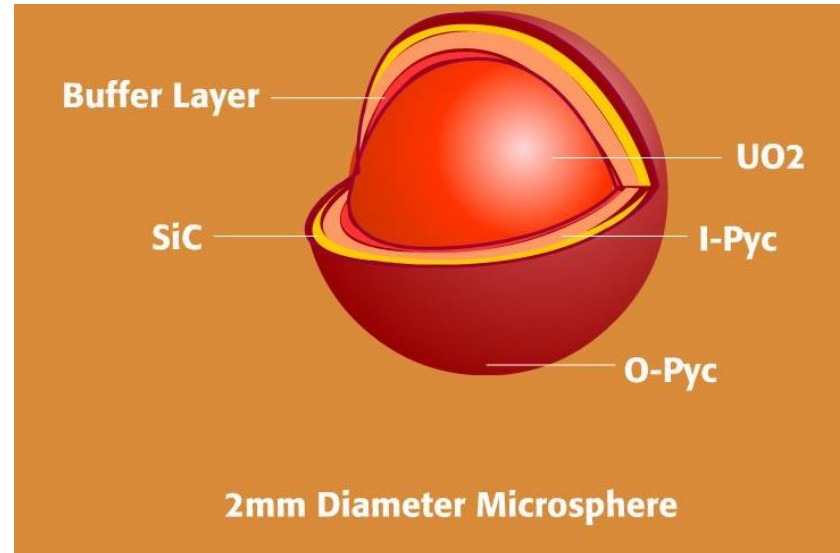
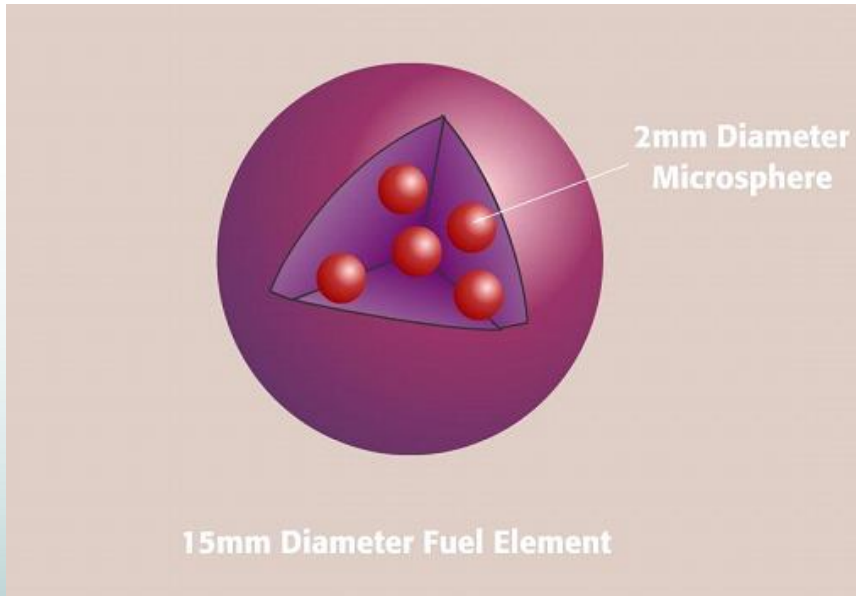


Fig. 13. Fuel pellets with clusters of poison (left: Gd; right: Sm).

$$\begin{aligned}\Sigma_{\text{fuel}}^{\text{eff}} &= \sum_i N_i^{\text{U,Pu}} \sigma_{i,\text{tot}}^{\text{U,Pu}} + \sum_j N_j^{\text{poison}} \sigma_{j,\text{tot}}^{\text{poison}} \\ &+ \sum_k N_k^{\text{FP}} \sigma_{k,\text{tot}}^{\text{FP}} + \sum_l N_l^{\text{Actinides}} \sigma_{l,\text{tot}}^{\text{Actinides}}.\end{aligned}$$

Applications : Distribution 3D des particules de combustible.



L'étude a pour objectif la visualisation de la distribution 3D de la particules de combustible dans la matrice de graphite pour déterminer l'uniformité des sphère de combustible.

Applications : Distribution 3D des particules de combustible.

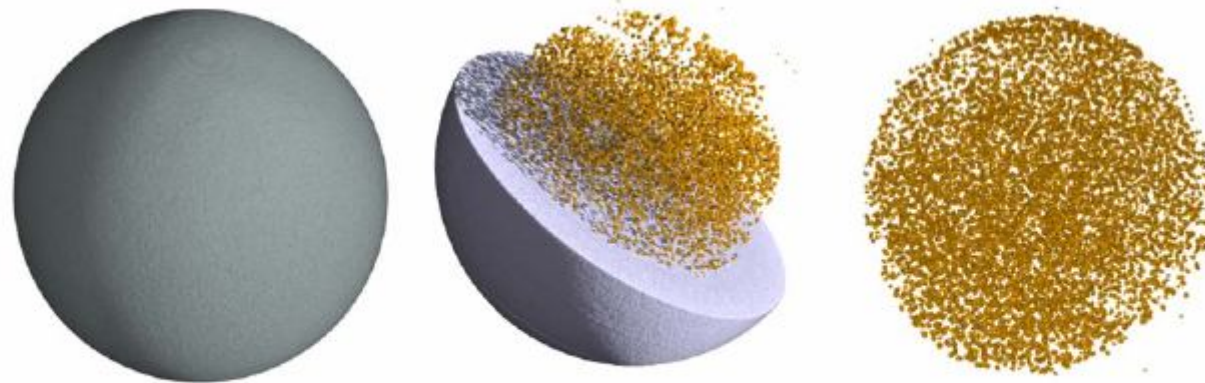


Fig. 11. A sphere type fuel element from the High Temperature Reactor (HTR) program was studied with neutron tomography. This sample is 6 cm in diameter and contains about 8500 individual fuel pebbles (diameter 0.5 mm), which were separated with image processing tools. Left: the graphite sphere from outside, middle: particles separated partly, right: the full amount of particles visualised.

Conclusions

- La neutronographie joue un rôle crucial pour l'amélioration de la qualité et le contrôle des éléments du combustible produits.
- En plus des contrôles qualitatifs, la digitalisation des systèmes de détection a permis d'effectuer des études quantitatives permettant d'avoir des informations plus précises et aidant à l'amélioration de la gestion du combustible nucléaires (enrichissement, détection de poison neutroniques...etc).
- Merci pour votre attention

